农业环境保护 2002, 21(3): 221 – 224
Agro-environmental Protection

不同土层镉污染状况对水稻吸收镉的影响

张敬锁[1], 李花粉[2]

(1. 北京市农业环境监测站, 北京 100029; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘　要: 在温室中利用土壤分层试验, 模拟不同土层镉污染对水稻吸收镉的影响。结果表明, 在任一生育期中, 表层土壤(0—10 cm)未污染的水稻体内各器官镉含量都明显低于表层污染的土壤; 随着表层土壤中镉污染程度的增加, 水稻体内镉含量逐渐增加; 表层土壤未污染时, 随着深层土壤(10—20 cm)污染程度的加重, 水稻地上部镉含量有增加的趋势, 但当表层土壤污染时, 随着深层土壤镉污染程度的增加, 地上部各器官镉含量的差异不明显。当表层土中镉浓度为 5 mg · kg^{-1} 时, 水稻籽粒中的镉含量为 0.264 mg · kg^{-1}, 超过国家粮食卫生标准(0.2 mg · kg^{-1}); 表层土壤未污染时, 即使当深层土壤镉浓度为 10 mg · kg^{-1} 时, 水稻籽粒中镉含量仅为 0.032 mg · kg^{-1}, 低于国家粮食卫生标准。

关键词: 镉; 土层; 吸收; 水稻
中图分类号: X503.231　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000 – 0267(2002)03 – 0221 – 04

由于大气的干湿沉降、肥料的使用、污泥的农用、污水灌溉等过程都可造成农田土壤中镉含量的提高[1、2], 因而采取有效措施减少污染土壤中镉进入植物的可食部位是关系到人体健康及农业持续发展的重要问题。镉在土壤中的迁移能力小, 通过污水灌溉进入土壤的镉主要集中在表层土壤中[8]。为了弄清楚不同土层镉污染对水稻地上部镉贡献的大小, 本试验在不同深度土层中添加镉, 模拟研究不同土层镉污染对水稻镉吸收及籽粒中镉累积的影响, 为通过农业工程方法改良镉污染土壤提供科学的依据。

1　材料与方法

1.1 供试材料

供试作物水稻(*Oryza, sativa L*)品种为科长 89 – 113。土壤取自中国农大 268 科学园表层土, 土壤类型为潮土, 过 5 mm 筛, 混匀。土壤理化性状见表 1。

表 1　土壤的基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the soil used

全氮 /g · kg^{-1}	速效钾 /mg · kg^{-1}	有机质 /g · kg^{-1}	pH	镉 /mg · kg^{-1}	DTPA – Cd /mg · kg^{-1}	CEC /cmol · kg^{-1}
1.02	78	13.0	7.6	0.075	0.040	153

1.2 试验设计

土壤分层试验, 土层共分二层; 选用 25 cm × 30 cm 的瓷盆, 每层装土 4 kg; 每层土壤厚度约 10 cm, 分 0—10 cm 为表层或上层土壤, 10—20 cm 为下层或深层土壤, 每层添加 3 个镉水平, 为 0、5、10 mg · kg^{-1} Cd ($CdCl_2$), 共 9 个处理, 每个处理重复 9 次。装盆时, 先把 $CdCl_2$ 和肥料均配制成溶液, 量取一定体积与少量土先混匀, 再拌到剩余的土中, 充分拌匀后, 装盆。肥料以尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾作为基肥。每盆施氮肥水平为 0.15 g · kg^{-1}、P_2O_5 为 0.10 g · kg^{-1}、K_2O 为 0.15 g · kg^{-1}。淹水 1 周后, 移入苗龄 1 个月秧苗(5 月 10 日移栽), 每盆移栽 4 穴, 每穴 3 株。

收稿日期: 2001 – 06 – 11; **修订日期**: 2001 – 07 – 19
作者简介: 张敬锁(1973—), 男, 硕士, 现主要从事环保科研和环境监测评价工作。

1.3 试验处理方案

以 B 表示表层添加镉，以 S 表示深层添加镉，其数字为镉浓度（mg · kg^{-1}），处理 B－S 为：CK－CK, CK－5, CK－10, 5－CK, 5－5, 5－10, 10－CK, 10－5, 10－10。

1.4 样品采集与制备

营养期（分蘖期）、开花期、成熟期 3 次采样用于样品分析。分蘖期取样：地上部分叶片和叶鞘分开取，根分上层根，下层根取样。成熟期、开花期取样：地上部分剑叶、老叶、茎、穗、籽粒，上层根和下层根取样。

2 结果与分析

2.1 不同土层镉污染对水稻营养期地上部叶片和叶鞘镉含量的影响

试验结果见图 1、图 2。

图 1 不同土层镉污染对水稻叶片中镉含量的影响

Figure 1 Effects of Cd contents at different soil profiles on its contents in rice leaf

图 2 不同土层镉污染对水稻叶鞘中镉含量的影响

Figure 2 Effects of Cd contents at different soil profiles on its contents in rice leaf sheath

从试验观察结果上看，不同土层镉污染对水稻正常生长都没有产生毒害。不同土层镉污染对地上部叶片、叶鞘中的镉含量产生明显的影响。当表层土壤未加镉处理时，随着深层土壤镉处理浓度的增加，地上部的叶片、叶鞘中镉含量之间都存在差异显著性（图 1、2）；当整层土壤都未添加镉时（CK－CK 处理），水稻地上部叶片和叶鞘镉含量分别为 0.126 mg · kg^{-1}、0.168 mg · kg^{-1}；而当下层土壤镉为 10 mg · kg^{-1} 时，水稻地上部叶片和叶鞘镉含量分别达到 0.283 mg · kg^{-1}、1.85 mg · kg^{-1}，说明在营养期虽然下层根系的生物量较小，下层根吸收的镉可向地上部运输，对水稻地上部镉含量有一定的贡献。

当表层土壤污染时，随着下层土壤镉污染的加重，水稻地上部叶鞘、叶片的镉含量之间差异不明显（图 1、2）；相对而言，下层根的贡献能力被掩盖了，说明上层土壤镉污染对水稻吸收和向地上部转移镉起着决定性作用。

在营养期，当下层土壤镉污染水平相同时，随着上层土壤镉污染程度的加重，水稻地上部叶片、叶鞘中镉含量之间存在着显著差异（图 1，图 2）。CK－10 与 5－CK 处理相比可知，当上层土壤未受污染而下层土壤污染严重时，水稻地上部叶片和叶鞘中镉含量明显低于表层轻污染而深层未受污染土壤上的地上部镉含量；这可能是由于深层土壤中根量少，其相应吸收镉总量少，因而对地上部器官中镉贡献能力较小，或可能是深层土壤根系的活力较弱，吸附与吸收镉很难运转到地上部的缘故。另外不论何种处理，水稻叶鞘中的镉含量都显著高于叶片中的镉含量，如当表层土壤镉污染为 10 mg · kg^{-1} 时，叶鞘中的镉含量达到 10 mg · kg^{-1} 以上，而叶片中的镉含量仅为 3.5 mg · kg^{-1}左右，两者之间存在着显著性差异。

2.2 不同生育时期水稻地上部各器官镉含量

试验结果见表 2、表 3。

从表 2、3 中可知，在水稻不同生育时期，随着上层土壤镉污染程度的加重，地上部各器官镉含量都明显地增加。在开花期，当土层处理为 5－CK，老叶、茎、剑叶、穗壳中的镉含量分别为 0.904、0.565、0.191、0.137 mg · kg^{-1}，都明显高于对照处理；当土层处理为 10－CK 时，老叶、茎、剑叶、穗壳中镉含量却达到了 2.384、2.033、0.378、0.326 mg · kg^{-1}，分别是 5－CK 处理的 2.63、3.69、1.98、2.38 倍（表 3）。当表层土壤未受污染时，随着深层土壤镉浓度的增加，水稻地上部各器官（老叶、茎、剑叶、穗壳）的镉含量都有一定程度的增加，但增加幅度较小，说明深层土壤中根对水稻地上部镉含量起着一定的作用；当表层土壤受镉污染时，随着深层土壤污染程度的增加（如 5－CK，5－5，5－10 处理），水稻地上部镉含量之间表现出的差异不明显；当表层土壤污染时，水稻地上部的镉含量都明显高于下层土壤污染时的地上部镉含量。以上的结果表明，表层土壤供镉的能力要明显强于下层土壤中镉供给。

表 2　不同土层镉污染对水稻开花期镉含量的影响(mg・kg^{-1})

Table 2　Impact of cadmium contents in different soil profiles on its contents in rice anthesis (mg・kg^{-1})

处理	CK－CK	CK－5	CK－10	5－CK	5－5	5－10	10－CK	10－5	10－10
老叶	0.009 f	0.080 fe	0.240 e	0.904 d	0.744 de	0.945 cd	1.284 bc	1.631 b	2.384 a
	(0.007)	(0.019)	(0.122)	(0.362)	(0.137)	(0.075)	(0.362)	(0.245)	(0.878)
茎	0.024 d	0.117 d	0.234 d	0.565 cd	0.460 cd	0.835 bc	0.856 b	1.303 ab	2.033 a
	(0.009)	(0.037)	(0.157)	(0.077)	(0.200)	(0.222)	(0.241)	(0.034)	(0.977)
剑叶	0.024 e	0.030 e	0.083 de	0.191 cd	0.221 bc	0.158 cd	0.250 bc	0.345 ab	0.378 a
	(0.012)	(0.011)	(0.042)	(0.042)	(0.024)	(0.040)	(0.082)	(0.028)	(0.158)
穗	NDd	0.003 d	0.047 d	0.137 c	0.142 c	0.178 c	0.220 b	0.534 b	0.326 a
		(0.003)	(0.042)	(0.022)	(0.026)	(0.019)	(0.052)	(0.012)	(0.134)

注:数据为平均值,括号内数据为标准差(SD);字母为邓肯法,5% 差异性,下同。

表 3　不同土层土壤镉污染对成熟期水稻各器官镉含量的影响(mg・kg^{-1})

Table 3　Cadmium contents in different rice parts affected by its contents in different soil profiles(mg・kg^{-1})

处理	CK－CK	CK－5	CK－10	5－CK	5－5	5－10	10－CK	10－5	10－10
老叶	0.017 e	0.036 e	0.153 de	1.187 bc	0.735 cd	1.427 bc	1.919 ab	1.705 b	2.325 a
	(0.008)	(0.011)	(0.105)	(0.476)	(0.037)	(0.532)	(0.442)	(0.440)	(0.348)
茎	0.013 c	0.054 c	0.161 c	1.476 ab	1.028 bc	1.411 ab	2.103 ab	1.628 ab	2.277 a
	(0.006)	(0.029)	(0.042)	(0.722)	(0.440)	(0.567)	(0.908)	(0.950)	(0.951)
剑叶	0.022 c	0.048 c	0.060 c	0.246 ab	0.146 bc	0.268 ab	0.364 a	0.252 ab	0.343 a
	(0.008)	(0.020)	(0.020)	(0.132)	(0.011)	(0.042)	(0.126)	(0.088)	(0.114)
穗	0.005 c	0.010 c	0.033 c	0.057 bc	0.058 bc	0.102 ab	0.137 a	0.124 a	0.130 a
	(0.004)	(0.001)	(0.002)	(0.040)	(0.012)	(0.023)	(0.052)	(0.050)	(0.043)
籽粒	0.004 d	0.021 d	0.032 d	0.282 c	0.264 c	0.337 bc	0.500 ab	0.418 abc	0.554 a
	(0.001)	(0.010)	(0.019)	(0.068)	(0.044)	(0.105)	(0.133)	(0.151)	(0.145)

2.3 不同土层镉污染对水稻籽粒中镉含量的影响

不同土层镉污染,明显影响着水稻籽粒中的镉含量,见表 3。随着表层土壤镉污染,水稻籽粒中的镉含量逐步提高,当上层土壤镉污染达到 5 mg・kg^{-1} 时,水稻籽粒中的镉含量达到 0.264—0.337 mg・kg^{-1}(超过国家粮食卫生标准 0.2 mg・kg^{-1});而上层土镉污染达到 10 mg・kg^{-1} 时,籽粒中的镉含量为 0.418—0.554 mg・kg^{-1}。未添加镉土壤(CK－CK),水稻籽粒中的镉含量为 0.005 mg・kg^{-1};上层土壤未受污染时,随着深层土壤镉污染程度的加重,籽粒中的镉含量也存在着差异性,但增加的程度明显小于上层土壤镉污染时的同样浓度梯度;当深层土壤镉污染浓度为 5.00 mg・kg^{-1} 时,水稻籽粒中的镉含量仅为 0.021 mg・kg^{-1},低于国家卫生标准。即使当深层镉污染浓度为 10 mg・kg^{-1} 时,籽粒中的镉含量也只为 0.032 mg・kg^{-1}。

当表层土壤污染时,随着深层土壤镉污染的加重,水稻籽粒中镉含量处理间的差异不明显。以 CK－5 和 5－CK,CK－10 和 10－CK 二处理间籽粒中镉含量比较来说,5－CK 处理籽粒中镉含量是 CK－5 处理的 13.4 倍,10－CK 处理籽粒中的镉含量是 CK－10 处理的 17.9 倍,结合开花期或成熟期表层土壤中根生物量和深层土壤中根生物量比值来看,说明在水稻生育后期,深层土壤中根对水稻籽粒中镉含量的贡献能力较小,即使在下层土壤污染严重时,籽粒中镉的含量依然很低,说明水稻籽粒中镉主要来自表层土壤中根对镉吸收和向地上部的转移。

3　讨论

从试验结果来看,不同土层镉污染明显影响着水稻体内各器官及籽粒中的镉含量。当表层土壤受污染时,水稻体内各器官包括籽粒中的镉含量都明显高于深层土壤镉污染。由于在实际的镉污染区,土壤中的镉也主要是集中在表层土壤中[9],因而易造成水稻及植物可食部分镉含量超标。

本试验结果表明,水稻籽粒镉含量中的镉主要来自表层土壤;当表层土壤镉浓度为 5.0 mg・kg^{-1} 时,水稻籽粒中镉含量就超过国家粮食卫生标准。在淹水条件下,水稻根系的生长和发育随不同生育期而变化;在生殖生长后期,水稻原根系的活性降低,对养分的吸收不是非常有效的,而此时在土壤表层水稻易形成新根系,这些表根在后期对养分的吸收是有利

的[10],籽粒中镉含量可能与后期形成新生根有关;但新生根对土壤中镉的吸收以及向籽粒中迁移的具体作用,还有待于研究。

试验结果还表明在深层土壤中水稻根系对镉的吸收和吸附并没有受土壤中氧化还原状况的影响,深层根中镉含量却高于表面氧化层中的镉含量。有研究认为在土壤淹水条件下,深层处于还原条件下,土壤中镉的有效性降低,减少植物对镉的吸收。造成本试验的结果可能由于在还原条件下,因高价铁和锰被还原成低价的,土壤胶体对镉吸附作用减弱;而低价的铁和锰在水稻根表因根系本身有泌氧作用,而形成铁锰胶膜增加对镉的吸附[11]。虽然深层根中镉含量较高,但由于在低氧胁迫条件下,根的代谢活性低,而影响到深层根中重金属向上部运输[12],造成水稻地上部镉含量受深层根的影响较小。利用本试验结果可以指导如何安全利用镉污染的土壤。由于土壤中镉主要集中在表层,初步可以通过深耕方法,使表层含镉土被移至深层,以降低植物对其吸收;或采用覆土的方法来降低植物对污染层中镉的吸收,达到改良土壤的目的,本试验也为这方面的工作提供了一定的科学依据。

参考文献:

[1] Andersson A and Siman G. Levels of Cd and some other trace elements in soils and crops as influenced by lime and fertilizer level[J]. *Acta Agric Scand*, 1991, 41:3 – 11.

[2] Bellet P F. Heavy metal extractabality in long sewage sludge and metal salt – amended soil[J]. *Journal of Environment Quility*, 1992, **20**(2): 481 – 486.

[3] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992.

[4] Van Driel W. Compersion of the heavy – metal uptake of cyperns esculentns and of agronomic plants grown on contaminate Dutch sediments [A]. USAE water – ways experiments station , Vicksburg missiippi , Miscellaneous paper D, 1985. 83 – 102.

[5] 曹仁林. 铬镉对作物品质的影响[J]. 土壤,1993, **25**(6):324 – 326.

[6] 陈 涛. 张士灌区镉土改良和水稻镉污染防治的研究[J]. 环境科学,1980, **1**(5):7 – 15.

[7] 邓波儿,刘同仇. 不同改良剂降低稻米镉含量的效果[J]. 华中农业大学学报,1993, **12**(2):117 – 121.

[8] Andersson A. Heavy metal in commercial fertilizer manure and lime cadmium balance for cultivated soils . P. 16 Lantbrukshogs. medd. A 283, Mark Vaxtez 100, Uppsala. 1997.

[9] 李书鼎, 马学军. 用 $^{115+115m}$Cd 研究 Ca^{2+} 和 Cl^{-} 对污染土壤镉吸收的影响[J]. 中国环境科学,1985, **5**(5):16 – 18.

[10] Kirk G J D. Root ventilation, rhizosphere modification and nutrition uptake by rice systems approaches for sustainable [J]. *Agricultural Development*, 1993.

[11] 李花粉. 根表铁氧化物及植物铁载体对水稻吸收镉的影响 [D]. 北京:中国农业大学,1996.

[12] Chino M. The distribution of heavy metals in rice plants influence by the time and the path of supply[J]. *J Sci Soil Manure Jpn*, 1973, 44: 204 – 210.